



ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ

Μεταβολισμός

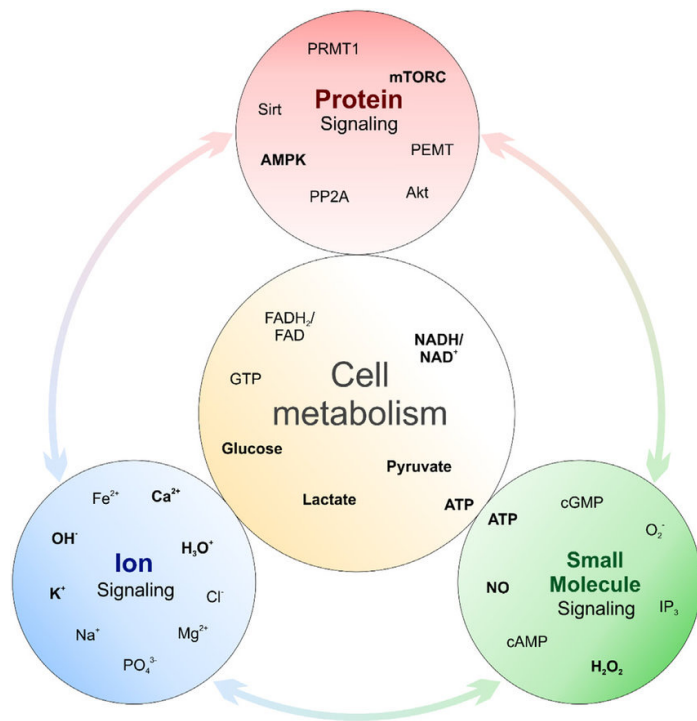
Τμήμα Αειφορικής Γεωργίας

Παναγιώτα Σταθοπούλου

Μάιος, 2024

Με ποιο τρόπο το κύτταρο αντλεί ενέργεια από το περιβάλλον του;

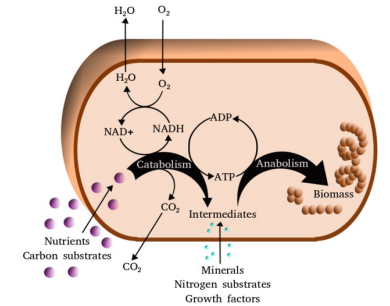
Με ποιον τρόπο συνθέτει τις δομικές μονάδες των μακρομορίων του και στη συνέχεια αυτά τα ίδια τα μακρομόρια;



Αυτές οι διεργασίες διεκπεραιώνονται από ένα εξαιρετικά ολοκληρωμένο δίκτυο χημικών αντιδράσεων, που είναι συνολικά γνωστές ως **μεταβολισμός ή ενδιάμεσος μεταβολισμός**

Ο μεταβολισμός περιέχει κοινά μοτίβα σε όλες τις μορφές ζωής.

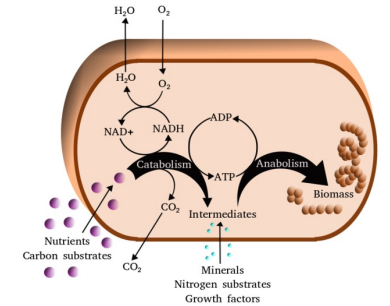
Γενικές Αρχές



1. Τα καύσιμα αποικοδομούνται και βήμα προς βήμα κατασκευάζονται μεγάλα μόρια σε μια σειρά από συνδυασμένες αντιδράσεις που ονομάζονται **μεταβολικές πορείες**.
2. Ένα νόμισμα κοινό σε όλες τις μορφές ζωής, **η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP)**, συνδέει τις πορείες που απελευθερώνουν ενέργεια με τις πορείες που απαιτούν ενέργεια
3. Η οξείδωση των καύσιμων μορίων ωθεί τον σχηματισμό της ATP

Ο μεταβολισμός περιέχει κοινά μοτίβα σε όλες τις μορφές ζωής.

Γενικές Αρχές



4. Αν και υπάρχουν πολλές μεταβολικές πορείες, σε πολλές από αυτές είναι κοινός ένας πεπερασμένος αριθμός τύπων αντιδράσεων και ιδιαίτερων ενδιαμέσων
5. Οι μεταβολικές πορείες ρυθμίζονται σε πολύ υψηλό βαθμό
6. Τα ένζυμα που μετέχουν στον μεταβολισμό είναι οργανωμένα σε μεγάλα σύμπλοκα ώστε να αυξάνεται η αποτελεσματικότητα

Ο μεταβολισμός αποτελείται από πολλές συζευγμένες και διασυνδεδεμένες αντιδράσεις

Οι ζώντες οργανισμοί απαιτούν **συνεχή τροφοδότηση ενέργειας** για τρεις κυρίως σκοπούς:

1. εκτέλεση μηχανικού έργου (σύσπαση μυών, κυτταρικές κινήσεις)
2. ενεργό μεταφορά μορίων και ιόντων
3. σύνθεση μακρομορίων και άλλων βιομορίων από απλά πρόδρομα μόρια

Η ελεύθερη ενέργεια που χρησιμοποιείται στις διεργασίες αυτές προέρχεται από το περιβάλλον

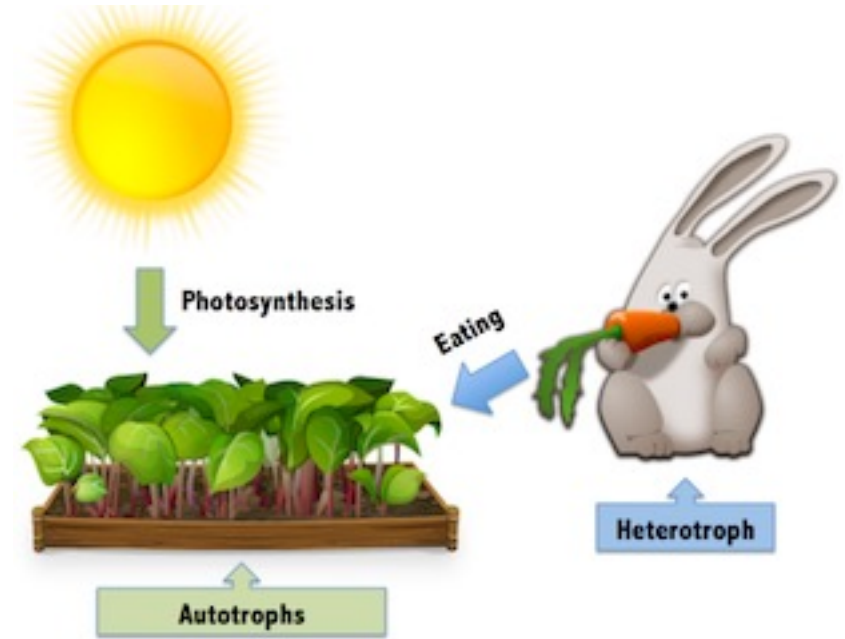
Ο μεταβολισμός αποτελείται από πολλές συζευγμένες και διασυνδεδεμένες αντιδράσεις

Φωτοσυνθετικοί ή Φωτότροφοι Οργανισμοί

Εισροή ενέργειας από το ηλιακό φως
ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ

Χημειότροφοι Οργανισμοί

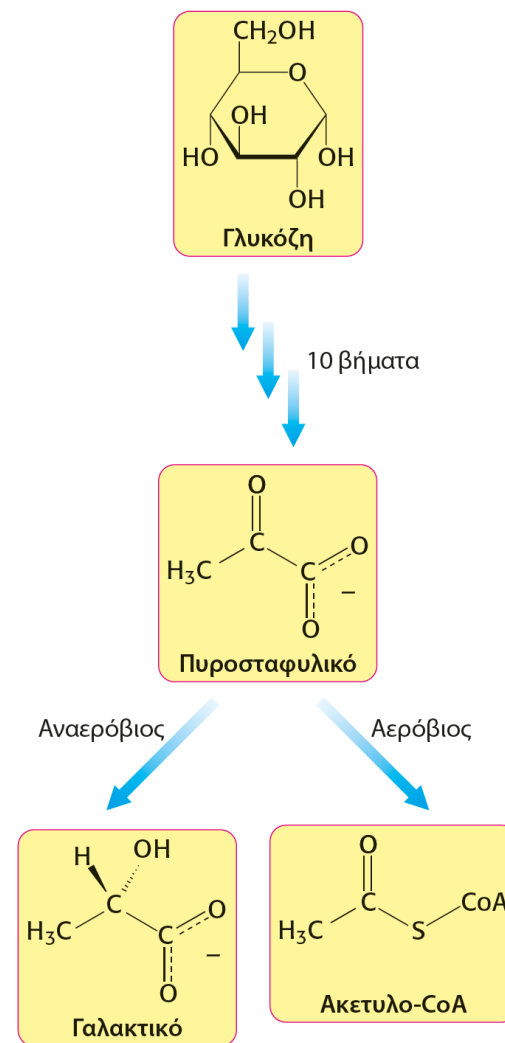
Εισροή χημικής ενέργειας από την οξείδωση των τροφών που παράγονται από τους αυτότροφους



Ο μεταβολισμός αποτελείται από αντιδράσεις που παράγουν ενέργεια και από αντιδράσεις που απαιτούν

Ο μεταβολισμός είναι μια σειρά χημικών αντιδράσεων οι οποίες αρχίζουν με ένα συγκεκριμένο μόριο και το καταλήγουν στο σχηματισμό ενός άλλου μορίου ή μορίων με προσεκτικά καθορισμένο τρόπο.

Οι πορείες αυτές είναι αλληλεξαρτώμενες και η δραστηρότητα τους συντονίζεται από εξαιρετικά ευαίσθητα μέσα επικοινωνίας στα οποία επικρατούν τα αλλοστερικά ένζυμα.



Μεταβολικές Πορείες

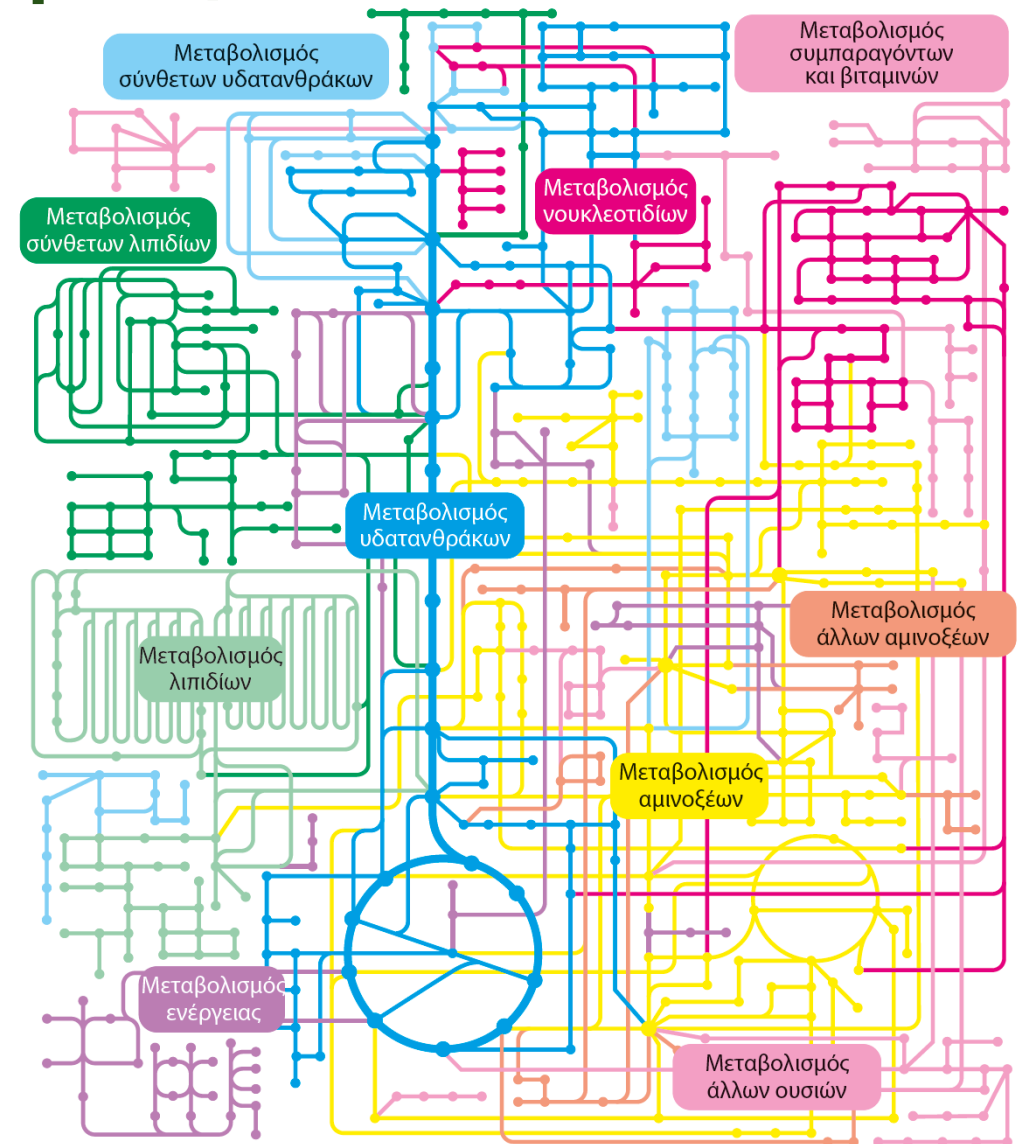
Καταβολισμός

Καύσιμα (υδατάνθρακες, λίπη) \rightarrow $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} +$ χρήσιμη ενέργεια

Αναβολισμός

Χρήσιμη ενέργεια + μικρά πρόδρομα μόρια \rightarrow πολύπλοκα μόρια

Μερικές πορείες μπορούν να είναι είτε αναβολικές είτε καταβολικές, αναλόγως της ενεργειακής κατάστασης του κυττάρου (αμφιβολικές πορείες).



Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει έναν μεταβολίτη!

Μια θερμοδυναμικά ευνοούμενη αντίδραση μπορεί να ωθήσει μια μη ευνοούμενη αντίδραση

Οι μεταβολές της ελεύθερης ενέργειας είναι προσθετικές

Συζευγμένες αντιδράσεις – η συνολική ελεύθερη ενέργεια της αντίδρασης είναι αρνητική

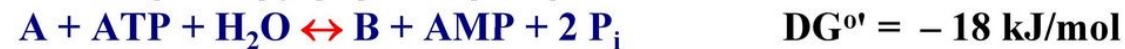
Enzyme 1:



Enzyme 2:



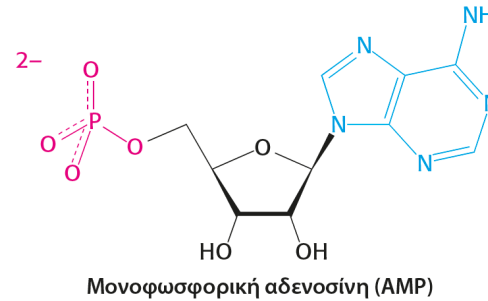
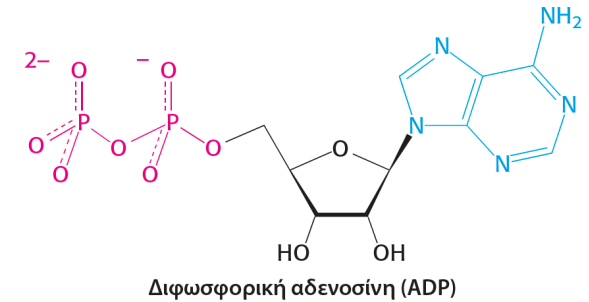
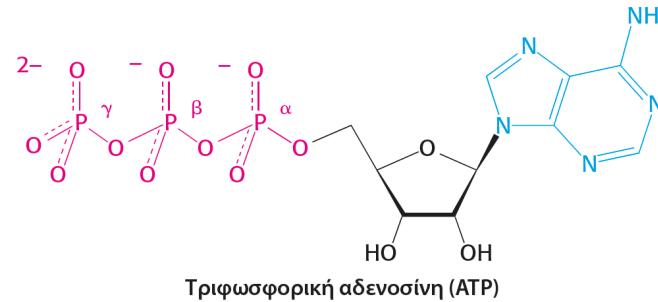
Συνολική αυθόρμητη αντίδραση:



Η αυθόρμητη υδρόλυση πυροφωσφορικού (PP_i) από την πυροφωσφατάση ωθεί προς τα δεξιά την αντίδραση που παράγει PP_i

ΑΤΡ – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Όπως το εμπόριο διευκολύνεται από την χρησιμοποίηση κοινού νομίσματος, έτσι και το εμπόριο του κυττάρου, ο μεταβολισμός, διευκολύνεται από την χρήση της **τριφωσφορικής αδενοσίνης (ΑΤΡ)** ως κοινού νομίσματος

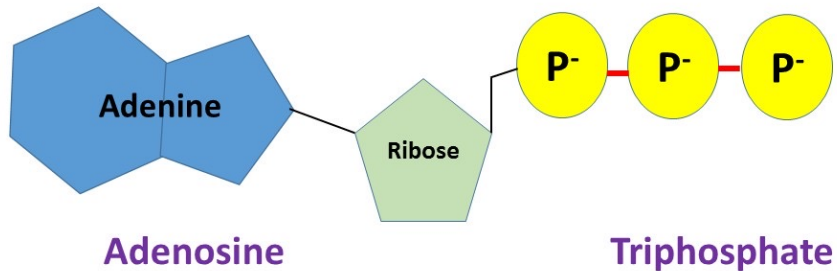


ΕΙΚΟΝΑ 15.3 Δομές των ΑΤΡ, ΑΔΡ, ΑΜΡ. Αυτές οι αδενυλικές ενώσεις αποτελούνται από αδενίνη (μπλε), ριβόζη (μαύρο) και μία τρι-, δι-, ή μονοφωσφορική μονάδα (κόκκινο). Το εσωτερικό άτομο φωσφόρου ορίζεται ως P_{α} , το μεσαίο ως P_{β} και το εξωτερικό ως P_{γ} .

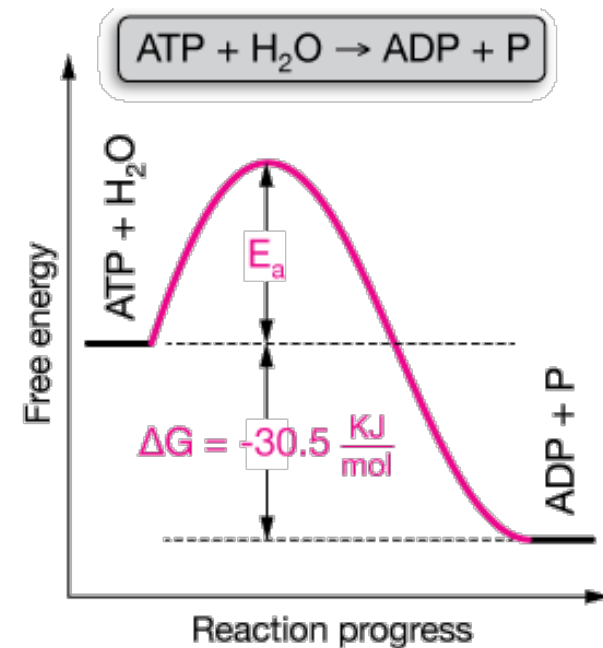


ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

- Μέρος της ελεύθερης ενέργειας που προέρχεται από την οξείδωση τροφίμων (όπως υδατάνθρακες, λίπη) και από το φως μετατρέπεται σε ATP
- Δρα ως δότης ελεύθερης ενέργειας στις περισσότερες πορείες που χρειάζονται ενέργεια, όπως η κίνηση, βιοσύνθεση

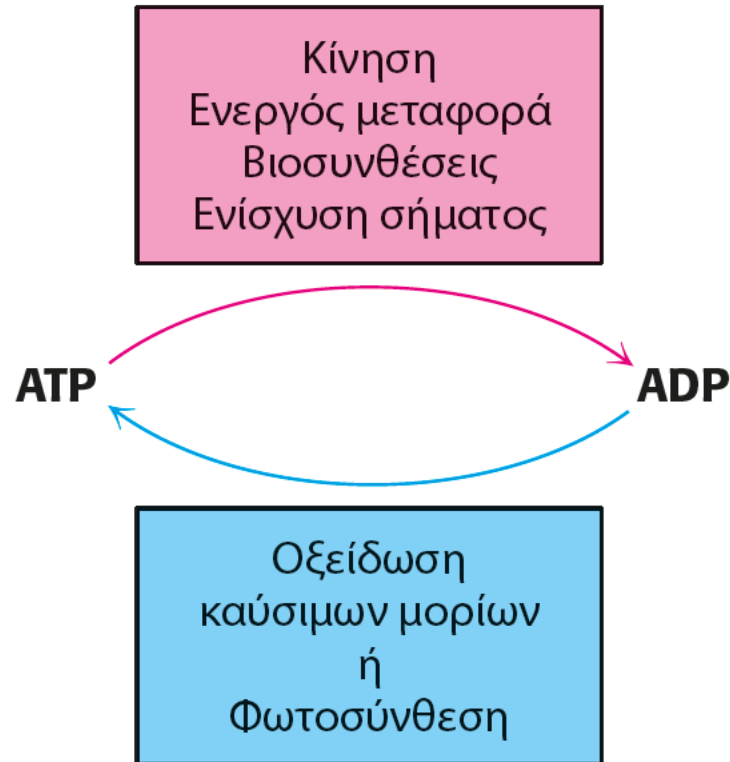


Ενεργειακά πλούσιο μόριο, διότι η τριφωσφορική της ομάδα περιέχει δύο δεσμούς φωσφορικού ανυδρίτη



ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Βασικός Τρόπος
Εναλλαγής της
Ενέργειας στα
Βιολογικά Συστήματα



ΕΙΚΟΝΑ 15.8 Κύκλος ATP-ADP. Αυτός ο κύκλος είναι ο θεμελιώδης τρόπος ανταλλαγής ενέργειας στα βιολογικά συστήματα.

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Μία μη ευνοούμενη αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί με σύζευξη με την υδρόλυση ATP

ATP – παράγοντας ενεργειακής σύζευξης

- **Τι κάνει την ATP έναν ιδιαίτερα αποτελεσματικό δότη φωσφορικής ομάδας;**

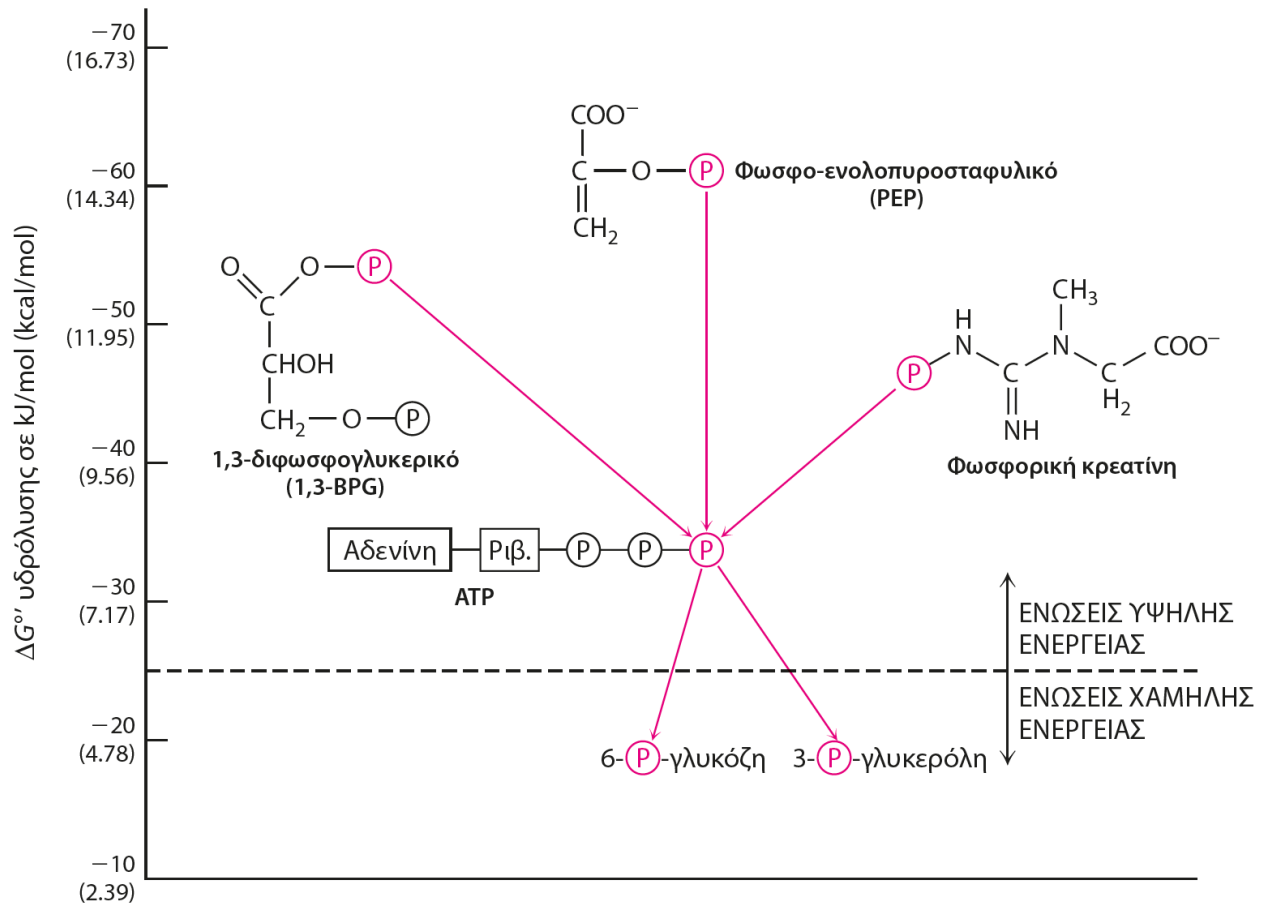
Η ATP έχει υψηλό δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας

- **Έχει το υψηλότερο δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας;**

Όχι, έχει ενδιάμεση θέση, και λειτουργεί ως φορέας

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

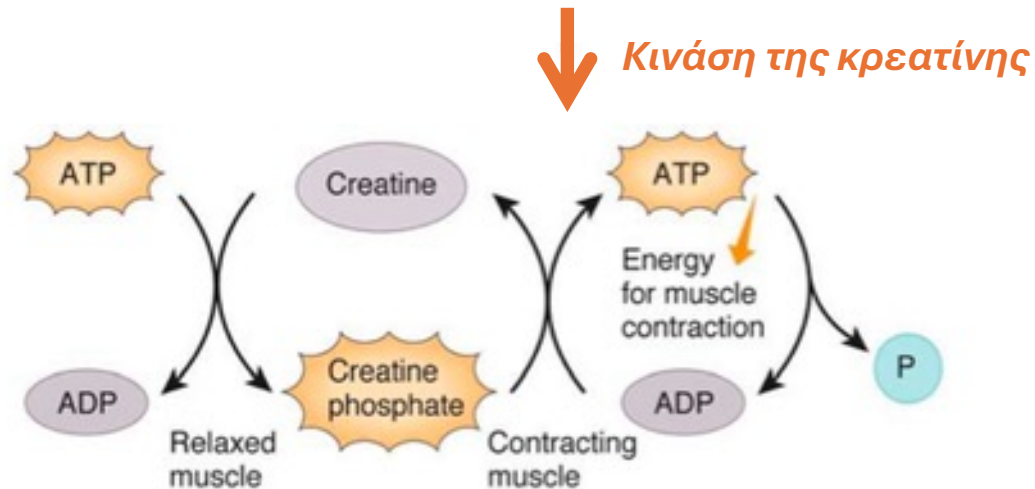
ΕΙΚΟΝΑ 15.6 Ενώσεις με υψηλό δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας. Ο ρόλος της ATP ως κυτταρικού νομίσματος ενέργειας αποσαφηνίζεται μέσω της σχέσης της με άλλες φωσφορυλιωμένες ενώσεις. Η ATP έχει ενδιάμεσο δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας μεταξύ των σημαντικών φωσφορυλιωμένων μορίων. Οι ενώσεις με υψηλό δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας (1,3 BPG, PEP και φωσφορική κρεατίνη) προέρχονται από τον μεταβολισμό των καύσιμων μορίων και χρησιμοποιούνται για να προωθήσουν τη σύνθεση της ATP. Η ATP, με τη σειρά της, δίνει μια φωσφορική ομάδα σε άλλα βιομόρια για να διευκολύνει τον μεταβολισμό τους. [Κατά D. L. Nelson και M. M. Cox, *Lehninger Principles of Biochemistry*, 5th ed. (W. H. Freeman and Company, 2009), Fig. 13-19.]



ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Η ποσότητα της ATP στους **μυς** επαρκεί για να διατηρήσει την συνολική δραστηριότητα για λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο

Η **φωσφορική κινάση στους μυς των σπονδυλωτών λειτουργεί** ως δεξαμενή υψηλού δυναμικού μεταφοράς φωσφορικών ομάδων οι οποίες μεταφέρονται στο ADP

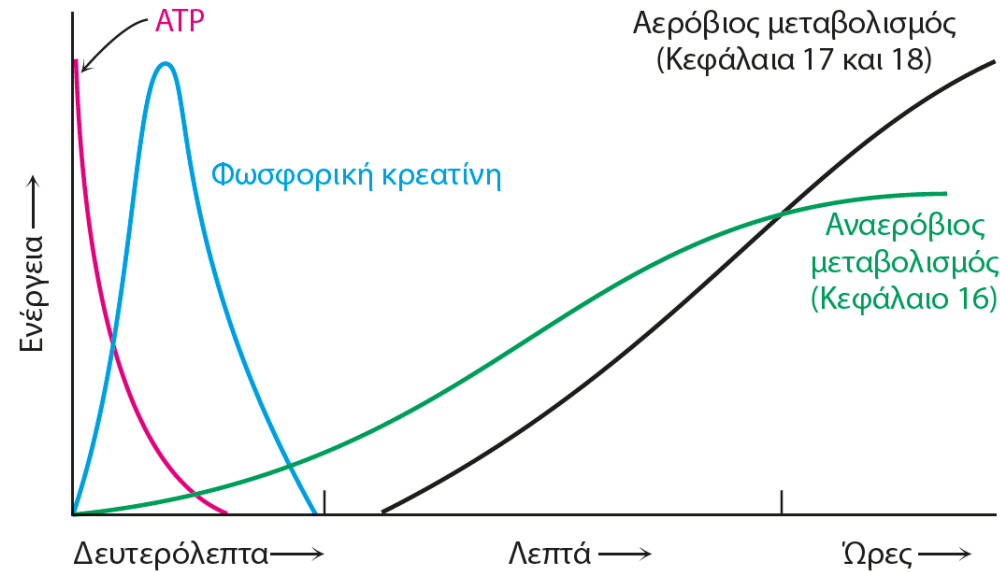


For brief periods (<15s) creatine phosphate can act as an ATP “store”
Creatine phosphate + ADP = creatine + ATP
Anaerobic

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

πηγές ATP κατά την διάρκεια άσκησης

Τα μόρια ATP ενεργούν ως βραχυπρόθεσμες «βιολογικές μπαταρίες» οι οποίες διατηρούν την ενέργεια μέχρι να απαιτηθεί αυτή σε διάφορες βιολογικές διεργασίες ή συστολή των μυών.



ΕΙΚΟΝΑ 15.7 Πηγές ATP κατά τη διάρκεια άσκησης. Η κινητήρια δύναμη για τα πρώτα δευτερόλεπτα της άσκησης παρέχεται από τις υπάρχουσες ενώσεις με υψηλό δυναμικό μεταφοράς φωσφορικής ομάδας (ATP, φωσφορική κρεατίνη). Ακολούθως, η ATP πρέπει να αναπαραχθεί από τις μεταβολικές πορείες.

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Η οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων είναι μια σπουδαία πηγή κυτταρικής ενέργειας

Ο κύκλος της ATP-ADP (θεμελιώδης τρόπος ανταλλαγής ενέργειας στα βιολογικά συστήματα)

Η ATP χρησιμεύει ως άμεσος δότης ελεύθερης ενέργειας παρά ως μορφή μακρόχρονης αποθήκευσης ελεύθερης ενέργειας.

Αν και η ποσότητα της ATP στο σώμα είναι 100 g - Ο ρυθμός ανακύκλωσης αυτής της ποσότητας είναι πολύ υψηλός

Ένας άνθρωπος σε ανάπαυση καταναλώνει 40 kg ATP σε 24 ώρες
Και 0,5 kg σε 1 λεπτό σε καταπόνηση (Τρέξιμο 2 ωρών, 60 kg ATP)

ΑΤΡ – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

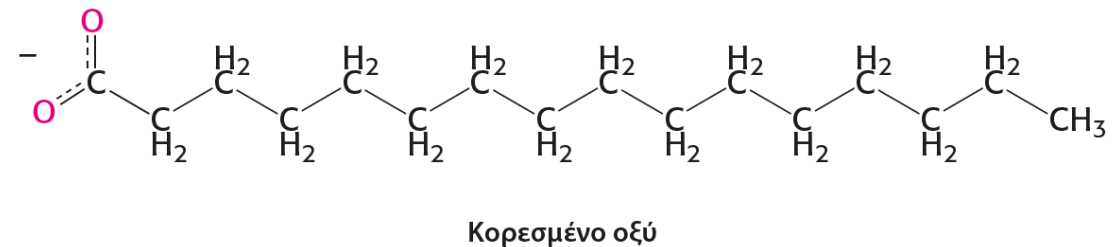
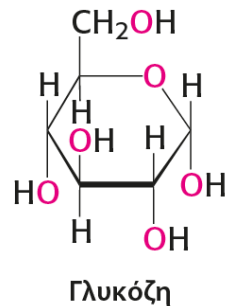
Η οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων είναι μια σπουδαία πηγή κυτταρικής ενέργειας

Στους αερόβιους οργανισμούς, το O_2 είναι ο τελικός δέκτης ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση του άνθρακα, και το προϊόν της οξείδωσης είναι το CO_2 .

Αν και τα καύσιμα μόρια είναι πιο πολύπλοκα από μονοανθρακικές ενώσεις, όταν οξειδώνεται ένα καύσιμο, η οξείδωση λαμβάνει χώρα σε ένα άτομο άνθρακα κάθε φορά.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός της ΑΤΡ.

ΕΙΚΟΝΑ 15.10 Καύσιμα πρώτης γραμμής. Τα λίπη είναι πιο αποδοτική πηγή καυσίμων από τους υδατάνθρακες, όπως π.χ. η γλυκόζη, διότι ο άνθρακας στα λίπη είναι πιο ανηγμένος.

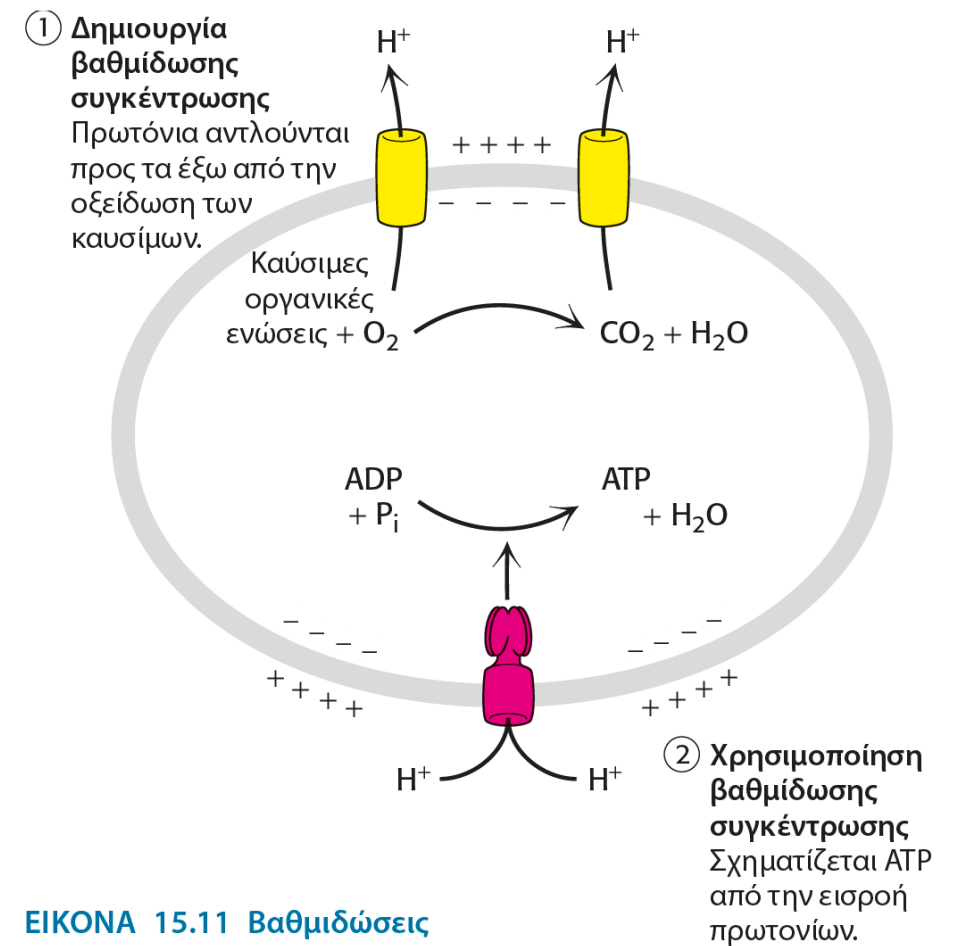


ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Η οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων είναι μια σπουδαία πηγή κυτταρικής ενέργειας

Οι βαθμιδώσεις συγκέντρωσης ιόντων μεταξύ των δύο πλευρών μεμβρανών παρέχουν μια σπουδαία μορφή κυτταρικής ενέργειας η οποία μπορεί να συζευχθεί με τη σύνθεση της ATP

Γενικά, οι βαθμιδώσεις συγκέντρωσης ιόντων είναι ένας πολλαπλά χρήσιμος τρόπος σύζευξης αντιδράσεων θερμοδυναμικά μη ευνοούμενων με ευνοούμενες.

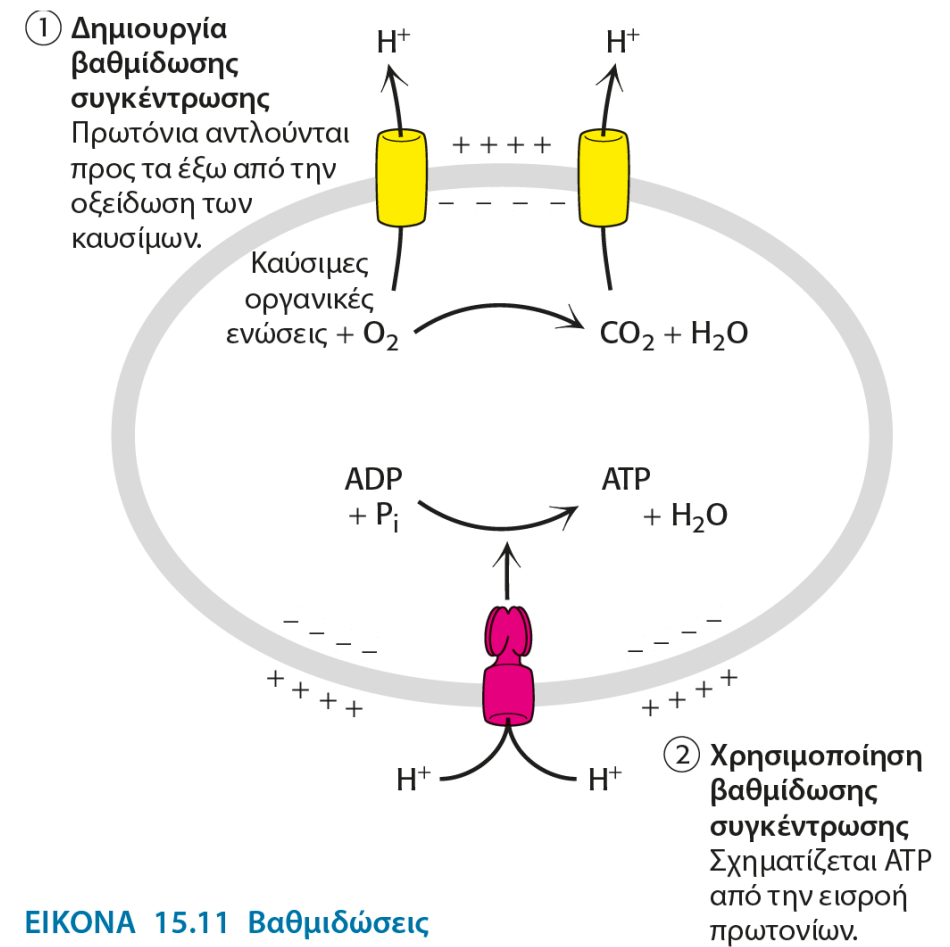


ΕΙΚΟΝΑ 15.11 Βαθμιδώσεις συγκέντρωσης πρωτονίων. Η οξείδωση των καύσιμων μορίων μπορεί να παρέχει την ισχύ για τον σχηματισμό των βαθμιδώσεων συγκέντρωσης πρωτονίων με τη δράση ειδικών αντλιών πρωτονίων (κίτρινοι κύλινδροι). Αυτές οι βαθμιδώσεις συγκέντρωσης πρωτονίων μπορούν, με τη σειρά τους, να ωθήσουν τη σύνθεση της ATP όταν τα πρωτόνια ρέουν μέσα από ένα ένζυμο που συνθέτει ATP (κόκκινο σύμπλοκο).

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Η οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων είναι μια σπουδαία πηγή κυτταρικής ενέργειας

- Πράγματι, στα ζώα, για την παραγωγή του 90% και πλέον της ATP είναι υπεύθυνες οι βαθμιδώσεις συγκέντρωσης πρωτονίων που παράγονται από την οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων. Αυτή η διεργασία ονομάζεται οξειδωτική φωσφορυλίωση.
- Η υδρόλυση της ATP μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί για να σχηματίσει βαθμιδώσεις συγκέντρωσης ιόντων διαφορετικών τύπων και λειτουργίας.

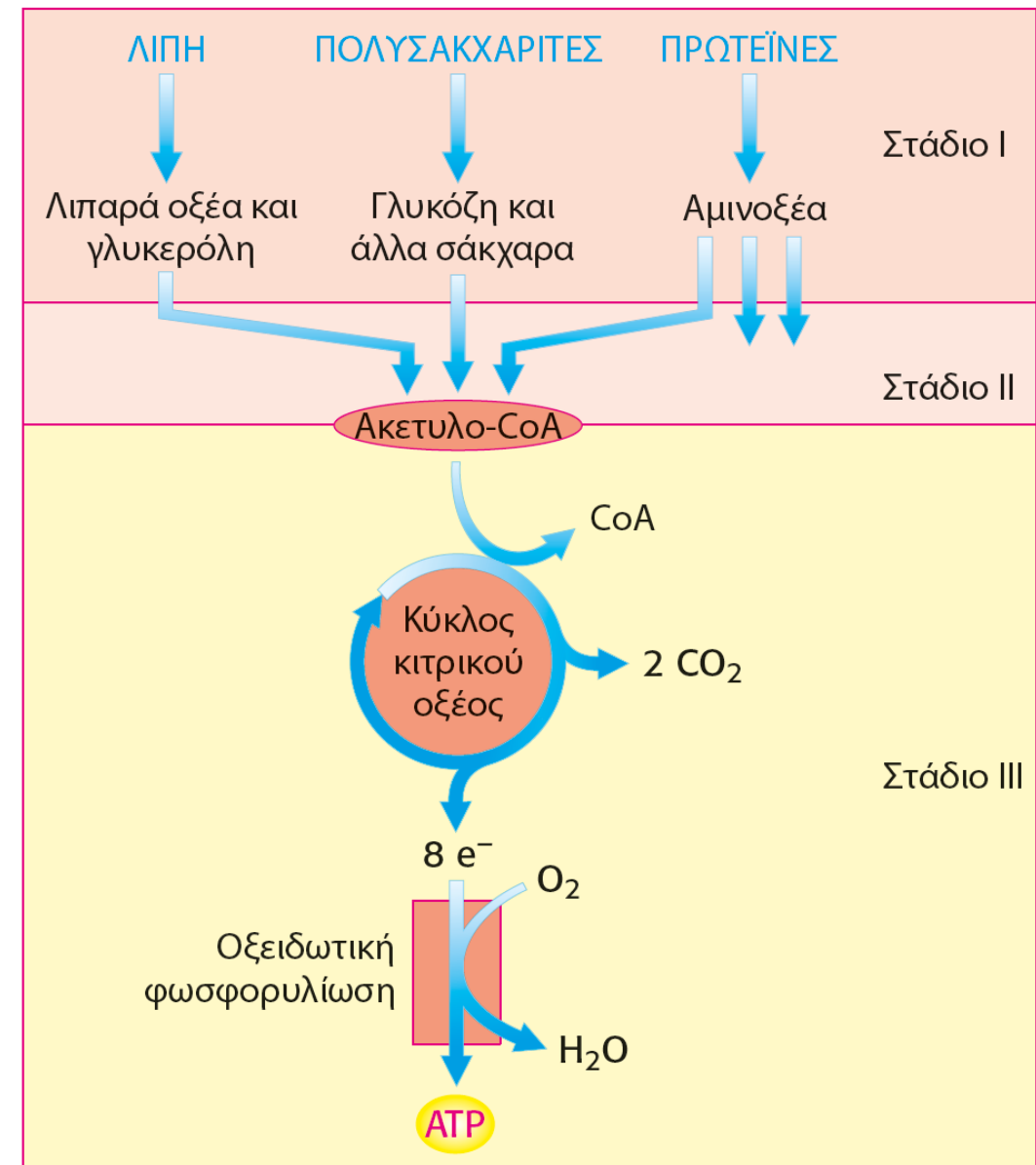


ΕΙΚΟΝΑ 15.11 Βαθμιδώσεις συγκέντρωσης πρωτονίων. Η οξείδωση των καύσιμων μορίων μπορεί να παρέχει την ισχύ για τον σχηματισμό των βαθμιδώσεων συγκέντρωσης πρωτονίων με τη δράση ειδικών αντλιών πρωτονίων (κίτρινοι κύλινδροι). Αυτές οι βαθμιδώσεις συγκέντρωσης πρωτονίων μπορούν, με τη σειρά τους, να ωθήσουν τη σύνθεση της ATP όταν τα πρωτόνια ρέουν μέσα από ένα ένζυμο που συνθέτει ATP (κόκκινο σύμπλοκο).

ATP – παγκόσμιο νόμισμα ελεύθερης ενέργειας

Η ενέργεια από τις τροφές εξαγεται σε τρία στάδια

1. Μεγάλα μόρια των τροφών διασπώνται σε μικρότερες μονάδες (ΠΕΨΗ).
2. Τα πολυάριθμα μικρά μόρια ανοικοδομούνται σε μερικές απλές μονάδες οι οποίες παίζουν κεντρικό ρόλο στο μεταβολισμό (κυρίως σε ακετυλο-CoA)
3. Η ATP παράγεται από την πλήρη οξείδωση της ακετυλικής μονάδας του ακετυλο-CoA



ΕΙΚΟΝΑ 15.12 Στάδια του καταβολισμού. Η εξαγωγή ενέργειας από τα καύσιμα μπορεί να διαιρεθεί σε τρία στάδια.

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς αποτελούν παράδειγμα του τμηματικού σχεδιασμού και της οικονομίας του μεταβολισμού

1. Ενεργοποιημένοι φορείς ηλεκτρονίων για την οξείδωση των καυσίμων.

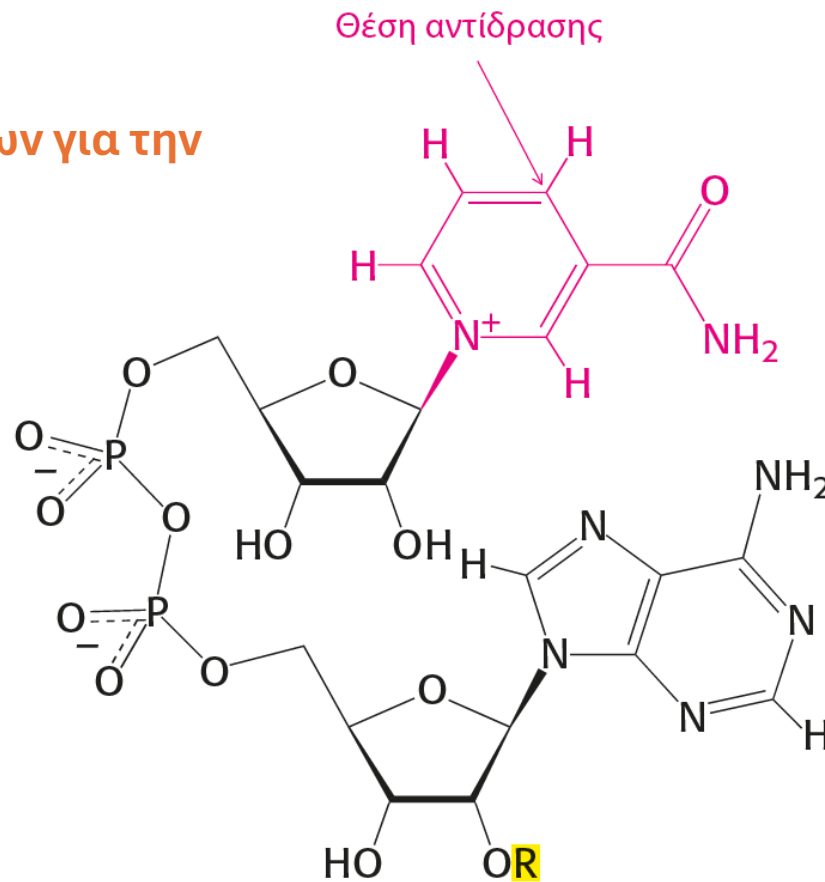
Στους αερόβιους οργανισμούς, ο βασικός δέκτης ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση των καύσιμων μορίων είναι το O_2 . Εντούτοις, τα ηλεκτρόνια δεν μεταφέρονται απευθείας στο O_2 .

Αντ' αυτού, τα καύσιμα μόρια μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια σε ειδικούς φορείς, οι οποίοι είναι είτε **νουκλεοτίδια πυριδίνης** είτε **φλαβίνες**.

Στη συνέχεια, οι ανηγμένες μορφές αυτών των φορέων μεταφέρουν τα υψηλού δυναμικού ηλεκτρόνια τους στο O_2 .

Κατά την οξείδωση των καύσιμων μορίων, το νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο είναι ένας από τους κύριους φορείς ηλεκτρονίων.

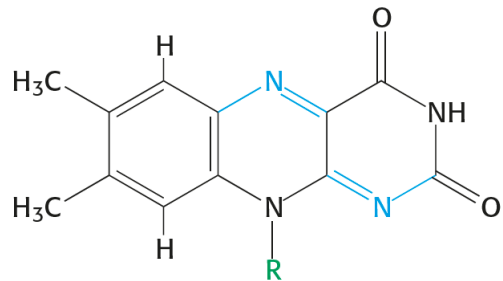
1. Ενεργοποιημένοι φορείς ηλεκτρονίων για την οξείδωση των καυσίμων.



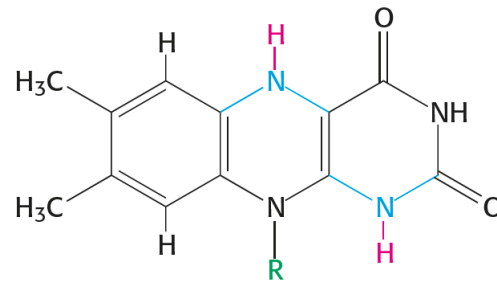
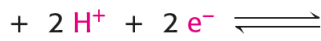
ΕΙΚΟΝΑ 15.13 Δομές των οξειδωμένων μορφών φορέων ηλεκτρονίων που προέρχονται από νικοτιναμίδιο. Το νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο (NAD^+) και το φωσφορικό νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο (NADP^+) είναι σημαντικοί φορείς ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Στο NAD^+ , $\text{R} = \text{H}$ · στο NADP^+ , $\text{R} = \text{PO}_3^{2-}$.

1. Ενεργοποιημένοι φορείς ηλεκτρονίων για την οξείδωση των καυσίμων.

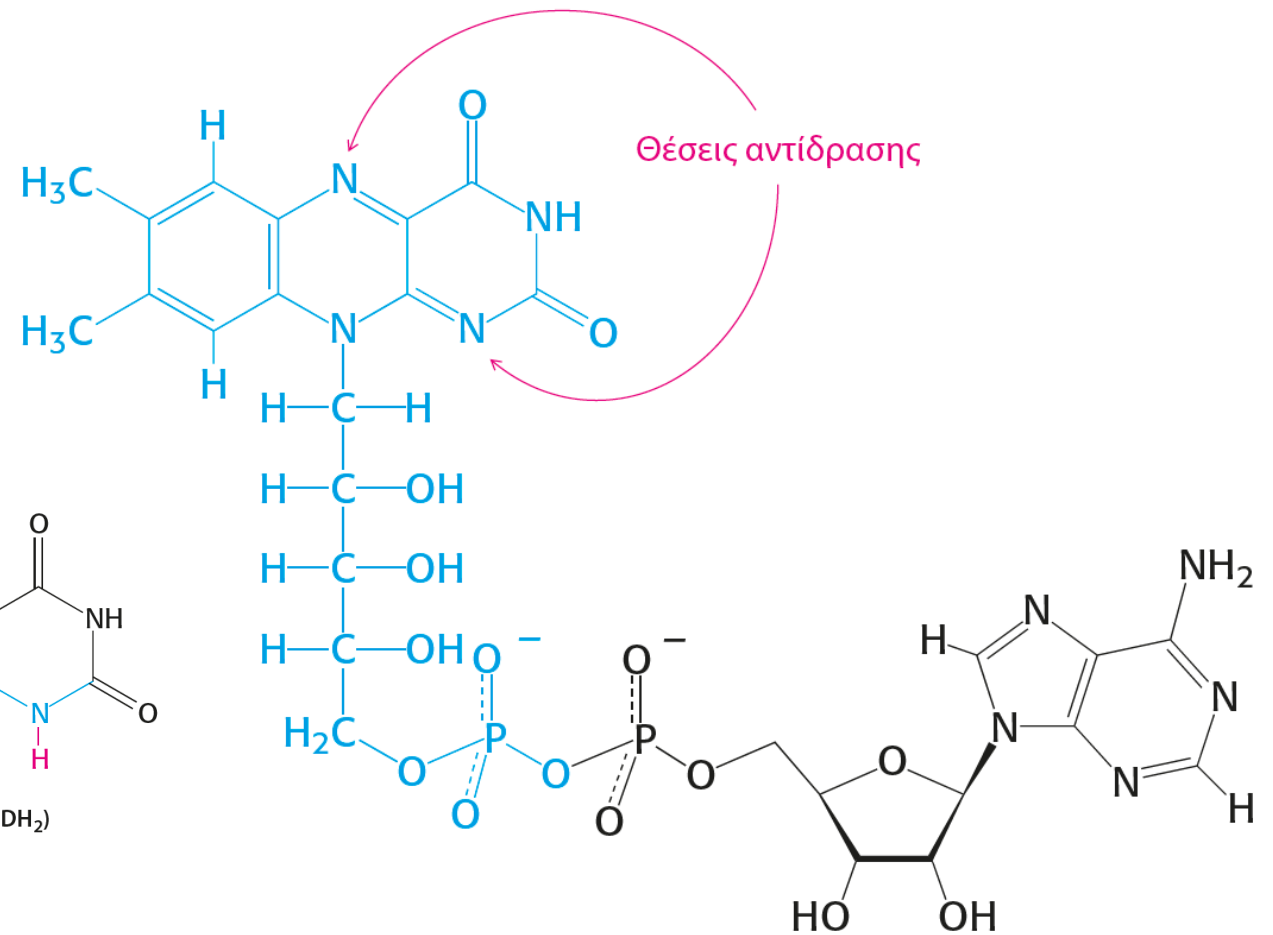
Συντομογραφίες οξειδωμένης και ανηγμένης μορφής είναι FAD και FADH₂



Οξειδωμένη μορφή (FAD)



Ανηγμένη μορφή (FADH₂)



ΕΙΚΟΝΑ 15.14 Δομή της οξειδωμένης μορφής του φλαβινο-αδενινο-δινουκλεοτιδίου (FAD). Αυτός ο φορέας ηλεκτρονίων αποτελείται από μια μονάδα φλαβινο-μονο-νουκλεοτιδίου (FMN) (δείχνεται με μπλε) και μια μονάδα AMP (δείχνεται με μαύρο).

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς αποτελούν παράδειγμα του τμηματικού σχεδιασμού και της οικονομίας του μεταβολισμού

2. Ένας ενεργοποιημένος φορέας ηλεκτρονίων για την αναγωγική βιοσύνθεση.

Στις περισσότερες βιοσυνθέσεις χρειάζονται ηλεκτρόνια υψηλού δυναμικού διότι οι πρόδρομες ενώσεις είναι περισσότερο οξειδωμένες από ό,τι τα προϊόντα

Στις περισσότερες αναγωγικές βιοσυνθέσεις ο δότης ηλεκτρονίων είναι το NADPH, η ανηγμένη μορφή του φωσφορικού νικοτιναμιδο-αδενινοδινουκλεοτιδίου (NADP⁺)

Μεταφέρει ηλεκτρόνια με τον ίδιο τρόπο με το NADH αλλά χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στην αναγωγική βιοσύνθεση, ενώ το NADH χρησιμοποιείται πρωταρχικά για την παραγωγή της ATP

Η επιπλέον φωσφορική ομάδα του NADPH είναι μια ετικέτα που δίνει τη δυνατότητα στα ένζυμα να διακρίνουν που θα χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόνια υψηλού δυναμικού αναβολισμό ή/και καταβολισμό

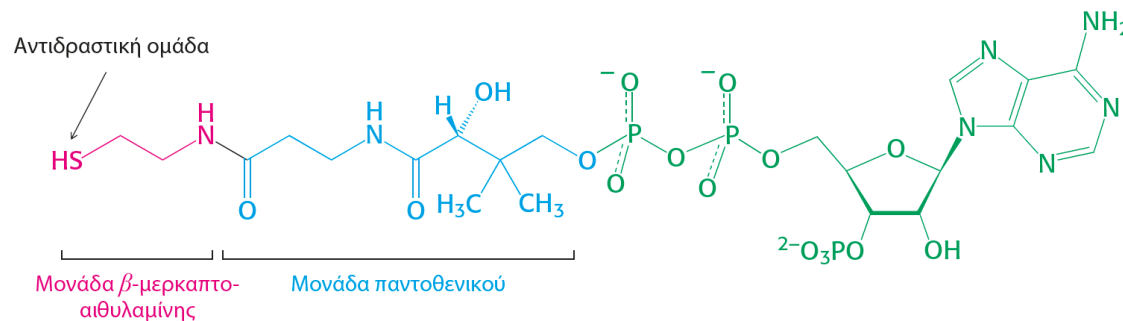
Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς αποτελούν παράδειγμα του τμηματικού σχεδιασμού και της οικονομίας του μεταβολισμού

3. Ένας ενεργοποιημένος φορέας μορίων δύο ανθράκων

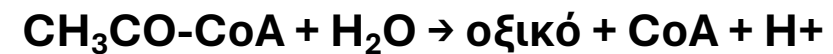
Συνένζυμο A (CoA) - κεντρικό μόριο στον μεταβολισμό, παράγωγο της βιταμίνης B5, είναι ένας φορέας ακυλομάδων

Οι ακυλομάδες είναι σημαντικά συστατικά τόσο του καταβολισμού, όπως στην οξείδωση των λιπαρών οξέων, όσο και του αναβολισμού, όπως στη σύνθεση των μεμβρανικών λιπιδίων.



ΕΙΚΟΝΑ 15.16 Δομή του συνενζύμου A (CoA-SH).

το ATP μεταφέρει φωσφορικές το ακέτυλο συνένζυμο A (CH₃CO-CoA) ακέτυλο ομάδες



$$\Delta G^\circ = -7,5 \text{ kcal/mol}$$

περιέχει ενέργεια (υπό την μορφή χημικού δεσμού) και έτσι μπορεί να μεταφέρει την ακέτυλο ομάδα σε αλλά μόρια, απουσία καταλύτη αντιδρά αργά με το νερό

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς – Βασικές όψεις του μεταβολισμού

- **Πρώτον**, τα NADH, NADPH και FADH₂ απουσία καταλύτη αντιδρούν αργά με το O₂
- Παρομοίως, απουσία καταλύτη η ATP και το ακετυλοCoA υδρολύονται αργά (σε ώρες ή ακόμη και σε ημέρες)
- Αυτά τα μόρια έχουν πολύ μεγάλη κινητική σταθερότητα, παρ' όλο που υπάρχει μεγάλη θερμοδυναμική ώθηση για αντίδραση με το O₂ (αναφορικά με τους φορείς ηλεκτρονίων) και το H₂O (για την ATP και το ακετυλο-CoA)
- Η κινητική σταθερότητα των μορίων αυτών απουσία ειδικών καταλυτών είναι ουσιαστική για τη βιολογική λειτουργία τους, διότι **δίνει τη δυνατότητα στα ένζυμα να ελέγξουν τη ροή της ελεύθερης ενέργειας και της αναγωγικής ισχύος.**

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς – Βασικές όψεις του μεταβολισμού

- **Δεύτερον**, στον μεταβολισμό οι περισσότερες εσωτερικές αλλαγές των ενεργοποιημένων ομάδων πραγματοποιούνται από μια μάλλον μικρή ομάδα φορέων
- Η ύπαρξη μιας επαναλαμβανόμενης ομάδας ενεργοποιημένων φορέων σε όλους τους οργανισμούς είναι ένα από τα ενοποιητικά μοτίβα της βιοχημείας.
- Επιπλέον, δείχνει εμφανώς τον τμηματικό σχεδιασμό του μεταβολισμού. Μια μικρή ομάδα μορίων διεκπεραιώνει μια ευρεία κλίμακα δραστηριοτήτων
- **Ο μεταβολισμός είναι εύκολα κατανοητός λόγω της οικονομίας και της κομψότητας του βασικού σχεδιασμού του.**

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα

Οι ενεργοποιημένοι φορείς

Σχεδόν όλοι οι ενεργοποιημένοι φορείς που δρουν ως συνένζυμα παράγονται από βιταμίνες

Πίνακας 15.2 Μερικοί ενεργοποιημένοι φορείς στον μεταβολισμό

Μόριο-φορέας στην ενεργοποιημένη μορφή	Μεταφερόμενη ομάδα	Πρόδρομη βιταμίνη
ATP	Φωσφορική	
NADH and NADPH	Ηλεκτρόνια	Νικοτινικό (νιασίνη)
FADH ₂	Ηλεκτρόνια	Ριβοφλαβίνη (βιταμίνη B ₂)
FMNH ₂	Ηλεκτρόνια	Ριβοφλαβίνη (βιταμίνη B ₂)
Συνένζυμο A	Ακυλική	Παντοθενικό
Λιποαμίδιο	Ακυλική	
Πυροφωσφορική θειαμίνη	Αλδεϋδική	Θειαμίνη (βιταμίνη B ₁)
Βιοτίνη	CO ₂	Βιοτίνη
Τετραϋδροφυλλικό	Μονοανθρακικές μονάδες	Φυλλικό
S-Αδενοσυλομεθειονίνη	Μεθυλική	
Ουριδινοδιφωσφορική γλυκόζη	Γλυκόζη	
Κυτιδινοδιφωσφορική διακυλογλυκερόλη	Φωσφατιδική	
Τριφωσφορικοί νουκλεοζίτες	Νουκλεοτίδια	

Οι μεταβολικές πορείες περιέχουν βασικές αντιδράσεις

Όπως ακριβώς υπάρχει οικονομία σχεδιασμού στη χρησιμοποίηση των ενεργοποιημένων φορέων, έτσι υπάρχει οικονομία σχεδιασμού στις **βιοχημικές αντιδράσεις**.

Οι χιλιάδες αντιδράσεις του μεταβολισμού, που εκ πρώτης όψεως δημιουργούν σύγχυση λόγω της ποικιλομορφίας τους, είναι δυνατόν να υποδιαιρεθούν σε έξι μόνο τύπους.

Τύπος αντίδρασης	Περιγραφή
Οξείδωση-Αναγωγή	Μεταφορά ηλεκτρονίων
Σύνδεση που χρειάζεται διάσπαση ATP	Σχηματισμός ομοιοπολικών δεσμών
Ισομερίωση	Αναδιατάξεις ατόμων
Μεταφορά ομάδας	Μεταφορά λειτουργικής ομάδας από ένα μόριο σε ένα άλλο
Υδρόλυση	Διάσπαση δεσμών με την προσθήκη νερού
Προσθήκη ή αφαίρεση λειτουργικών μονάδων	Προσθήκη σε διπλούς δεσμούς ή αφαίρεση ώστε να σχηματιστούν διπλοί δεσμοί

Οι μεταβολικές πορείες ρυθμίζονται με 3 τρόπους

Το πολύπλοκο δίκτυο των μεταβολικών αντιδράσεων πρέπει να ρυθμίζεται αυστηρά.

Αλλά....

Την ίδια στιγμή, ο μεταβολικός έλεγχος πρέπει να είναι ελαστικός, για να προσαρμόσει τη μεταβολική δραστηριότητα στις συνεχείς αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος του κυττάρου.

Ο μεταβολισμός ρυθμίζεται με έλεγχο:

(1) της ποσότητας των ενζύμων

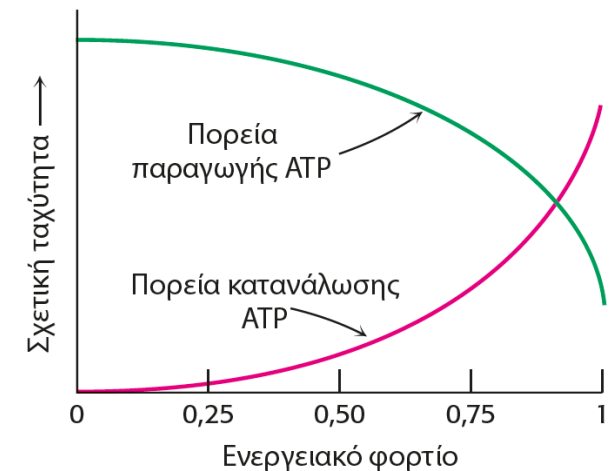
εξαρτάται από την ταχύτητα της σύνθεσης και από την ταχύτητα αποικοδόμησης

(1) της καταλυτικής δραστηρότητάς τους και

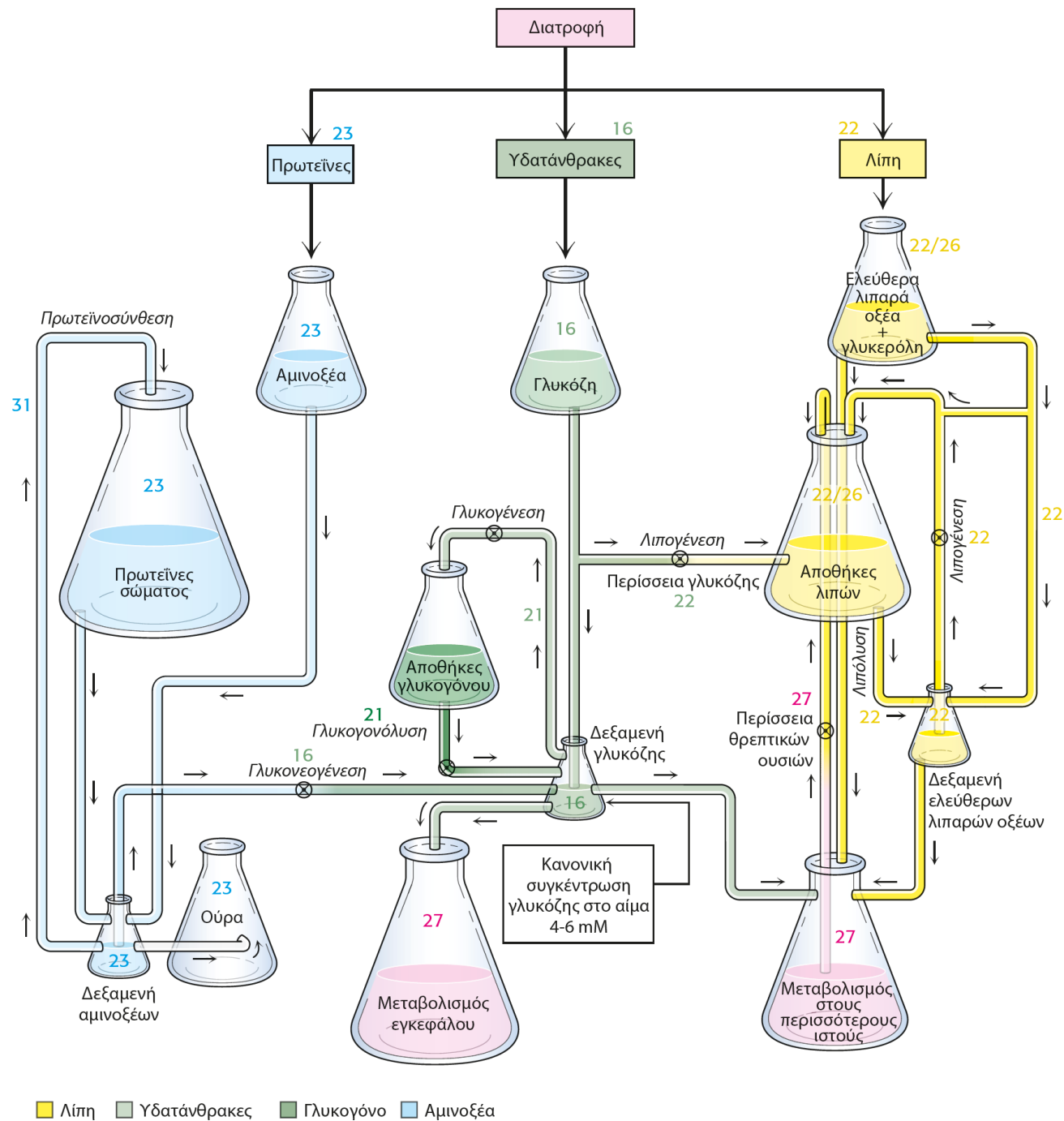
αλλοστερικός έλεγχος, ορμόνες, κυτταρικό ενεργειακό φορτίο

(1) της ευκολίας πρόσβασης στα υποστρώματα.

διαμερισματοποίηση, έλεγχος ροής υποστρώματος



ΕΙΚΟΝΑ 15.20 Το ενεργειακό φορτίο ρυθμίζει τον μεταβολισμό. Όταν το ενεργειακό φορτίο είναι υψηλό, η ATP αναστέλλει τις σχετικές ταχύτητες μιας τυπικής πορείας παραγωγής ATP (καταβολική) και διεγείρει μια τυπική πορεία που χρησιμοποιεί ATP (αναβολική).



ΕΙΚΟΝΑ 15.19 Ομοίωση.
 Η διατήρηση ενός σταθερού κυτταρικού περιβάλλοντος απαιτεί πολύπλοκη μεταβολική ρύθμιση η οποία συντονίζει τη χρήση των αποθεμάτων των θρεπτικών ουσιών. Οι αριθμοί παραπέμπουν στα κεφάλαια όπου συζητούνται τα αντίστοιχα θέματα. [Κατά D. U. Silverthorn, *Human Physiology: An Integrated Approach*, 3rd ed. (Pearson, 2004), Figure 22-2.]